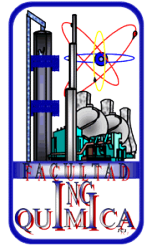




BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE UNA
INTERFACE DE CONTROL DIGITAL PARA UN
SISTEMA DE REACCIÓN QUE PRODUCE UNA
MEZCLA DE GAS OXIHIDRÓGENO”**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de:

Licenciatura en Ingeniería Química

Presenta:

GRACIELA LUNA LUNA

Asesor de tesis:

DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

Puebla, Pue. Junio 2018



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/936/2017
Asunto: Registro de Tema de Tesis

**C. LUNA LUNA GRACIELA
PASANTE DE LA LICENCIATURA
EN INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E:**

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Química cuyo título es el siguiente:

“PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE UNA INTERFACE DE CONTROL DIGITAL PARA UN SISTEMA DE REACCIÓN QUE PRODUCE UNA MEZCLA DE GAS OXIHIDRÓGENO”

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA**

Director de Tesis: Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR UN AÑO.**

A T E N T A M E N T E
“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”
H. Puebla de Z., 7 de noviembre de 2017.


M.I.C. MA. GPE. TITA VÁZQUEZ E. DE LOS MONTEROS
SECRETARIA ACADÉMICA

C.c.p. Director de Tesis: Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre
C.c.p. Archivo.

80 AÑOS
DE UNIVERSIDAD

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00
Ext. 7250 y 7251

*Dedicado a mi familia y
amigos que se convirtieron en familia.*

AGRADECIMIENTOS

“Hoy brindo por todos aquellos,
que me enseñaron a vivir el hoy
como si no hubiera un mañana.”

- L. -

A mis padres porque cada uno me ha enseñado cosas diferentes, pero siempre coincidieron en que tenía que ser mejor todos los días y nunca retroceder y a mis hermanos por ser las personas que me hicieron más fuerte, gracias a su apoyo he podido llegar hasta donde me encuentro ahora. Gracias por ayudarme a permanecer con los pies en el suelo, pero con la mente en las cosas grandes que uno puede conseguir.

A mis amigos Angel, Karla, Adán, Alan y a M.C. Roy por siempre estar apoyándome lo necesitara o no, sobre todo, demostrarme que se puede trabajar y divertirse al mismo tiempo y que con compañía la frustración no es menor solo es compartida.

A C. por impulsarme a seguir, a ver el mundo diferente y comprender que la vida no es fácil.

A la Doctora Mayra Ruiz Reyes, gracias por compartir su conocimiento y sobre todo por el apoyo brindado durante la carrera.

A mi asesor Doctor Francisco Manuel Pacheco Aguirre, gracias por tanta paciencia y dedicación que tuvo antes y durante la realización de esta tesis, sus consejos y experiencias compartidas estoy segura me hicieron una mejor persona.

Y a ti, por estar siempre, apoyarme y sobre todo obligame a continuar cuando ya veía todo perdido.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	10
1.1 Hidrogeno.....	11
1.1.1 Electrolisis	12
1.1.2 Electrolizador	12
1.2 Control	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
JUSTIFICACIÓN	16
OBJETIVO GENERAL	16
Objetivos Específicos	16
HIPÓTESIS	17
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1 Metodología del Objetivo Específico 1	19
2.2 Metodología del Objetivo Específico 2.....	19
2.3 Metodología del Objetivo Específico 3.....	20
2.4 Metodología del Objetivo Específico 4.....	20
2.5 Metodología del Objetivo Específico 5.....	21
3. RESULTADOS	22
3.1 Resultados del Objetivo Especifico 1.....	23
3.2 Resultados del Objetivo Especifico 2.....	30
3.3 Resultados del Objetivo Especifico 3.....	35
3.4 Resultados del Objetivo Especifico 4.....	48
Bibliografía	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Obtención de H ₂ (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).....	11
Figura 2. Celda típica de electrólisis alcalina (Koroneos et al, 2004).	13
Figura 3. Componentes básicos de un sistema de control (C. Kuo, 1996).....	14
Figura 4. Sistema modular para la producción de HHO.	23
Figura 5. Módulo de almacenamiento.	24
Figura 6. Módulo de producción de HHO.	25
Figura 7. Sistema de protección.....	25
Figura 8. Tablero para reactores.	25
Figura 9. Tablero modificado.....	26
Figura 10. Tanque de almacenamiento de electrolito.....	26
Figura 11. Modulo de reacción modificado.....	27
Figura 12. Diferentes configuraciones que puede tener el electrolizador.....	29
Figura 13. Conexión de la pantalla TFT a Arduino	35
Figura 14. Diagrama de conexión del Relay a Arduino, realizado en Fritzing.	36
Figura 15. Código para el Relevador.....	36
Figura 16. Diagrama de conexión del sensor YF-s401 a Arduino realizado en Fritzing.	37
Figura 17. Código para el sensor YF-s401.....	37
Figura 18. Diagrama de conexión del sensor MPXV7002DP a Arduino realizado en Fritzing	39
Figura 19. Programación en Arduino del tubo pitot.	40
Figura 20. Diagrama de conexión del sensor HC-SR04 a Arduino, realizado en Fritzing.	42
Figura 21. Código del sensor HC-SR04.	42
Figura 22. Cálculo de un tubo parcialmente lleno.	43
Figura 23. Placa neutra con empaque.	43
Figura 22. Diagrama de conexión del sensor Acs712 a Arduino, realizado en Fritzing	45
Figura 23. Código para el sensor Acs712.	45
Figura 24. Diagrama de conexión del sensor Voltaje a Arduino, realizado en Fritzing.	46

Figura 25. Código para el sensor de Voltaje.	46
Figura 26. Diagrama de conexión del módulo SD, realizado en Fritzing.....	46
Figura 27. Código para escritura de datos en el Módulo SD.....	47
Figura 28. Código para lectura de datos del Módulo SD.....	48
Figura 29. Bocetos de a) Pantalla inicial. b) Pantalla de contraseña c) Primer menú	48
Figura 30. a) Pantalla de advertencias. b) Pantalla de especificación de numero de placas.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes del sistema de reacción.....	28
Tabla 2. Sensores para medición de flujo.	30
Tabla 3. Sensores para presión y velocidad del gas.	31
Tabla 4. Sensores de nivel.....	31
Tabla 5 Sensores que miden distancia.	32
Tabla 6. Sensores de voltaje y corriente	33
Tabla 7. Sensores individuales de voltaje y corriente.....	34
Tabla 8. Designación de los pines para conexión de pantalla TFT.	35
Tabla 9. Resultados de las pruebas realizadas con el tubo pitot.....	40
Tabla 10. Resultados de las pruebas	41

RESUMEN

En el presente trabajo se aborda una propuesta tecnológica para el desarrollo e implementación de un sistema de control basada en una interface gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés) en una plataforma mecatrónica, la propuesta surge como respuesta a la necesidad de controlar el equipo diseñado por Pacheco et al (2017) denominado sistema modular de reacción, a su vez es el resultado de un estudio para tratar de producir gas combustible.

Este equipo cuenta con un sistema modular el cual tiene 12 reactores electrolíticos de celda seca que pueden modificar tanto la posición como su configuración de placas dependiendo el estudio que se desee realizar, sin embargo, el llenado de estos se realiza de manera manual, el suministro de energía que recibe es a partir de una conexión eléctrica comercial (DC) o proveniente de paneles solares, por lo cual es necesario monitorear en tiempo real el voltaje y amperaje que nos permita conocer el comportamiento real del sistema de producción de hidrogeno, por lo que se propone un entorno visual sencillo para facilitar al usuario el uso y comunicación con el sistema modular.

El sistema desarrollado integró el control de nivel y vigilancia de variables como son el voltaje, amperaje de la celda, así como la evaluación presión y flujo de gas producido mediante el uso de instrumentos además de una tarjeta de control y adquisición de datos.

INTRODUCCIÓN

El hidrógeno (H_2) es un combustible limpio para diversos usos que, combinado con sistemas de celdas solares o sistemas de energía eólica, desempeñará un papel importante como portador de energía para el desarrollo sostenible en el futuro (Bennet *et al*, 2011)

La noción del hidrógeno como vector de energía y la visión de una economía de hidrógeno no es nueva. El hidrógeno se ha utilizado y producido con fines industriales desde aproximadamente 1920. Debe enfatizarse que el hidrógeno no es una fuente de energía en sí mismo sino un portador secundario de energía de la misma manera que la electricidad. En lo que respecta a la seguridad del suministro o las emisiones de gases de efecto invernadero, cualquier ventaja del uso de hidrógeno depende de cómo se produce. (Ball & Weeda, 2015)

Existe una amplia variedad de procesos disponibles para la producción de H_2 que, de acuerdo con las materias primas utilizadas, podrían dividirse en dos categorías principales, las tecnologías convencionales y las renovables. La primera categoría procesa los combustibles fósiles e incluye los métodos de reformado de hidrocarburos y pirolisis (Nikolaidis & Poullikkas, 2017), sin embargo, cuando el hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles, el carbono se descarga a la atmósfera y esto contribuye al calentamiento global (Lipták, 2017). La segunda categoría agrupa los métodos que producen hidrógeno a partir de recursos renovables, ya sea de biomasa o agua. Lo referente a la obtención de H_2 por medio de agua se refiere a los métodos como son la electrólisis, la termólisis y la fotoelectrólisis (Nikolaidis & Poullikkas, 2017). La electrólisis es un método muy conocido, que constituye la técnica más efectiva para la disociación del agua. Una unidad de electrólisis típica o electrolizador, consiste en un cátodo y un ánodo sumergidos en un electrolito, y generalmente cuando se aplica corriente eléctrica, el agua se divide y el hidrógeno se produce en el cátodo mientras se genera oxígeno en el lado del ánodo (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

Aunque los electrolizadores se han utilizado durante décadas, todavía hay una necesidad de mejoras en muchos aspectos principalmente en reducción de los

costos de fabricación, distribución e instalación; mejoras de eficiencia en: fuente de alimentación y principalmente en *sistemas de control* (Bhandari *et al*, 2014).

El control automático ha desempeñado un papel muy importante en el avance de la ingeniería y la ciencia. Los avances en la teoría y la práctica del control automático ofrecen los fundamentos necesarios para obtener un comportamiento óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar u optimizar los procesos con el objeto de obtener mejores resultados y simplificar el trabajo de muchas operaciones manuales rutinarias, así como otras actividades, la ingeniería trata de comprender y controlar las fuerzas de la naturaleza en beneficio de la humanidad (Carrillo Paz, 2011).

1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

1.1 Hidrogeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, constituyendo aproximadamente el 75% de toda la materia, sin embargo, no está disponible en la Tierra en forma elemental, pero puede ser producido a partir de sus compuestos encontrados en fuentes naturales o industriales (Z. Baykara, 2018).

Existe una amplia variedad de procesos disponibles para la producción de H_2 que, de acuerdo con las materias primas utilizadas, podrían dividirse en dos categorías principales, las tecnologías convencionales y las renovables como se puede ver en la Figura 1.

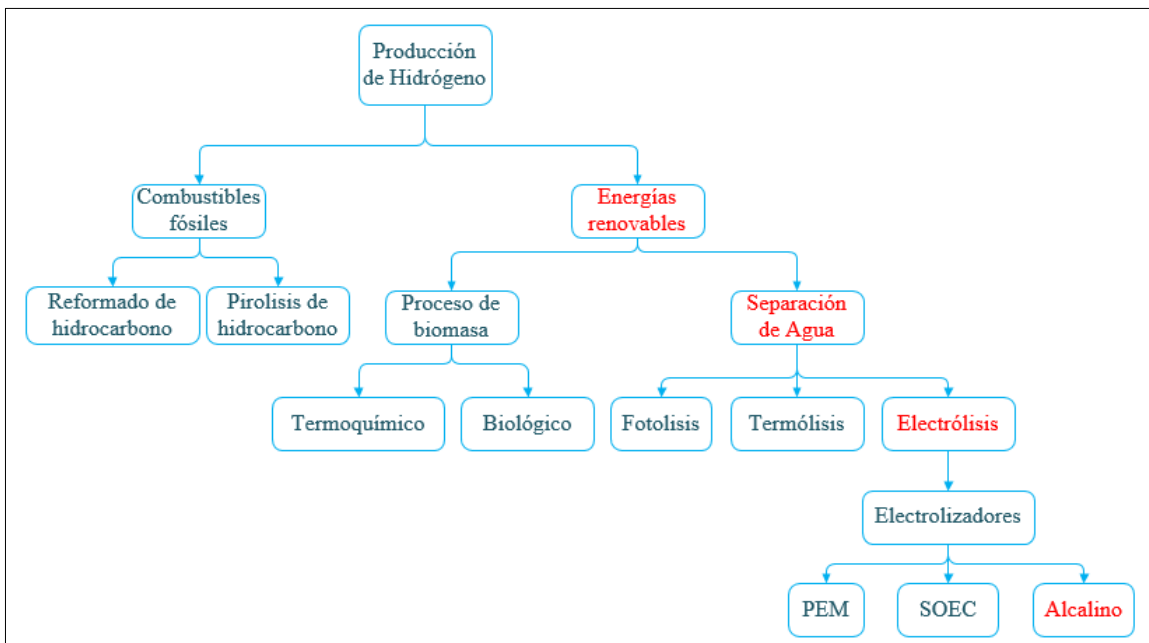


Figura 1. Obtención de H_2 (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

La primera categoría procesa los combustibles fósiles e incluye los métodos de reformado de hidrocarburos y pirolisis (Nikolaidis & Poullikkas, 2017), sin embargo, cuando el hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles, el carbono se descarga a la atmósfera y esto contribuye al calentamiento global (Lipták, 2017).

La segunda categoría agrupa los métodos que producen hidrógeno a partir de recursos renovables, ya sea de biomasa o agua. Lo referente a la obtención de H_2

por medio de agua se refiere a los métodos como son la electrólisis, la termólisis y la fotoelectrólisis (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

Los principales usos industriales del hidrógeno incluyen el proceso de producción de amoníaco (en industrias fertilizantes) mediante el proceso Haber-Bosch y en refinerías de aceite, así como otros usos en la industria alimenticia y metalúrgica (Lehner, 2014).

1.1.1 Electrolisis

La electrólisis es un método conocido, que constituye la técnica más efectiva para la disociación del agua. (Nikolaidis & Poullikkas, 2017). Es un proceso en el cual el agua se separa en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de energía eléctrica (reacción (1)) (Bhandari *et al*, 2014), sin embargo, la reacción es altamente endotérmica, por lo que la energía requerida es proporcionada por la corriente continua de electricidad (DC). (Ursua *et al*, 2012)



1.1.2 Electrolizador

En general, hay tres tipos de electrolizadores disponibles: membrana de electrolito de polímero (PEM), celda electrolítica de óxido sólido (SOFC) y electrolizador alcalino (Bhandari *et al*, 2014).

En el electrolizador PEM, el agua se introduce en el ánodo, donde se divide en protones (iones de hidrógeno, H⁺) que a su vez viajan a través de la membrana hasta el cátodo para formar H₂, mientras que el oxígeno que se queda con agua. En SOEC, el agua se introduce en el cátodo donde se divide en H₂ que se separa del agua en una unidad de separación externa e iones de hidróxido (OH⁻) que a su vez viaja a través del electrolito acuoso al ánodo para formar O₂. Los sistemas SOEC en la parte de la energía eléctrica se reemplaza por térmica, por lo que la temperatura aumenta y, en consecuencia, el H₂ queda en la corriente de vapor sin reaccionar (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

Finalmente, la celda de electrolisis de agua alcalina consta de dos electrodos separados por un diafragma hermético como se muestra en la Figura 2. Al conectar

una corriente continua a los electrodos, se produce hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo. La demanda de energía de un electrolizador alcalino depende de las características de los electrodos y condiciones operacionales. Una de las mayores ventajas de este tipo de electrolizador es que la vida útil es de hasta 30 años, aunque es necesaria una revisión general cada 7-15 años para reemplazar/reactivar los electrodos y reemplazar los diafragmas (Bhandari *et al*, 2014).

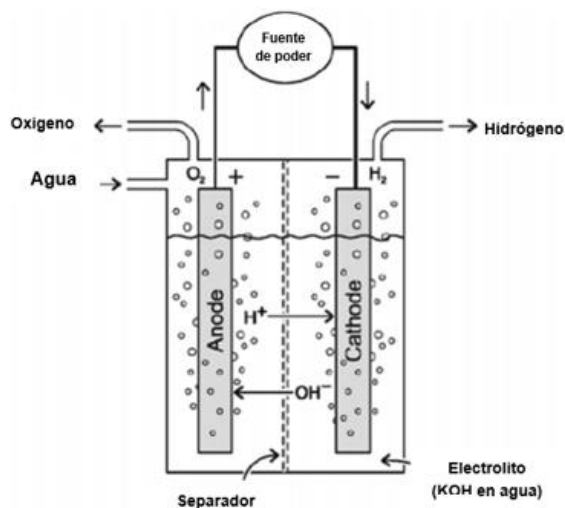
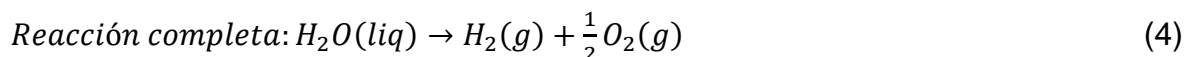
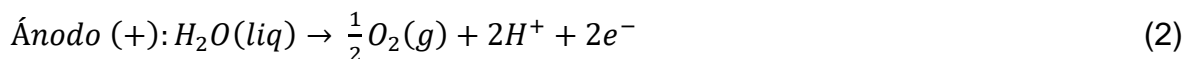


Figura 2. Celda típica de electrólisis alcalina (Koroneos *et al*, 2004).

Las reacciones que toman lugar en el electrolito, se muestran mediante las ecuaciones 2, 3 y 4 (Koroneos *et al*, 2004).



Para favorecer la conductividad en la reacción es necesario el uso de electrolitos.

El electrolito es usualmente una solución acuosa, de naturaleza alcalina y por lo que tiene un alto índice de conductividad iónica. Estos criterios pueden ser satisfechos usualmente con ácidos fuertes o compuestos alcalinos fuertes como el hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de sodio (NaOH) entre otros, aunque se reporta que una

solución de KOH al 30% contiene la máxima conductividad (Ursua, Gandia, & Sanchis, 2012).

Los electrodos utilizados en estos procesos deben ser conductores eléctricos y preferentemente con gran área de reacción, por esto usualmente se utilizan placas como electrodos, al administrar corriente directa a las placas que están en contacto con el electrolito, se desencadena la reacción de electrólisis en la superficie de éstas.

1.2 Control

Las variables de operación de cualquier proceso tienen restricciones establecidos ya sea por las limitaciones físicas del equipo o por la naturaleza del proceso. Desde el punto de vista de control, estas limitaciones físicas son establecidas en la etapa de diseño de equipos o plantas, dentro de lo estipulado por normas ambientales, de seguridad y rentabilidad del proceso (Turton et al., 1998).

Definimos un sistema de control como el conjunto de elementos que funcionan de manera concatenada para proporcionar una salida o respuesta deseada. Los componentes básicos de un sistema de control pueden ser descritos por:

- a. Objetivos de control
- b. Componentes del sistema de control
- c. Resultados o salida

La relación básica entre estos tres componentes se muestra en la Figura 3 los objetivos de control pueden ser identificados como entradas o señales entrantes, los resultados son considerados las salidas o las variables controladas; en general, el objetivo del sistema de control es controlar la salida de manera ordenada actuando los elementos de control sobre la señal de entrada. (Carrillo Paz, 2011)

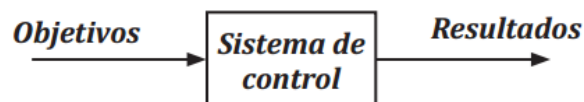


Figura 3. Componentes básicos de un sistema de control (C. Kuo, 1996).

Para desarrollar un sistema de control, se requiere de los siguientes 4 elementos básicos (Corripio & Smith, 1991):

1. **Sensor** o elemento primario.
2. **Transmisor** o elemento secundario.
3. **Controlador** considerado el cerebro del sistema de control
4. **Elemento final de control**, puede tratarse de válvulas, bombas de velocidad variable, y motores eléctricos.

Estos componentes llevan a cabo las tres operaciones básicas de todo sistema de control (Ogata, 2010):

1. **Medición (M)**: la medición de la variable que se controla se hace generalmente mediante la combinación de sensor y transmisor.
2. **Decisión (D)**: con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor que se desea.
3. **Acción (A)**: como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, generalmente realizada por el elemento final de control.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Facultad de Ingeniería Química de la BUAP cuenta con un equipo desarrollado por Pacheco *et al*, (2017) como parte de un proyecto multidisciplinario, para la producción de una mezcla de gas oxihidrógeno a partir de electrolisis de agua, el cual actualmente se opera de manera manual. Desde la puesta en marcha del equipo, la lectura de variables hasta la adquisición de datos resulta poco viable, lo que provoca que no sean reproducibles los resultados, estos problemas llevan a la necesidad de automatizar la adquisición de datos.

JUSTIFICACIÓN

En lo que respecta al equipo propuesto por Pacheco *et al*, (2017) y con el objetivo de minimizar los errores al momento de la operación, así como también en la obtención de datos que permiten la operación y un mejor rendimiento del sistema de reacción es necesario contar con un sistema de hardware acoplado a una interface por computadora (software) que proporcione un control confiable y en tiempo real de las variables de operación del sistema de reacción propuesto.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo como interface de control para la operación de un sistema de reacción electrolítica que produce una mezcla de gas oxihidrógeno a partir de electrolisis de agua.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar el sistema de reacción diseñado por Pacheco *et al*, 2017.
2. Evaluar y seleccionar los sensores y actuadores adecuados a las condiciones de operación del equipo.
3. Definir la lógica de funcionamiento de la interface y del controlador a través del diseño propuesto.

4. Programar la interface de control acoplando todos los sensores, controladores y actuadores.
5. Conectar y comprobar el funcionamiento del Hardware y Software del elemento de control en el sistema de reacción.

HIPÓTESIS

El equipo desarrollado por (Pacheco *et al*, 2017) para la producción de una mezcla de gas oxihidrógeno a partir de electrolisis de agua, al contar con una interface de control y gestión de operación tendrá la capacidad de operar de manera confiable y la adquisición de datos será precisa, esto sin olvidar que los elementos de control serán automatizados con lo cual se podrá contar con un equipo optimizado lo que facilitará el control del hardware y manejo de software.

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología del Objetivo Específico 1

La caracterización del sistema de reacción diseñado por Pacheco, *et al* (2017) se llevó a cabo a partir de un análisis visual lo cual consiste en conocer de manera adecuada el equipo. Después con herramientas especializadas se midió el módulo de reacción para poder obtener las dimensiones físicas (largo, ancho, altura), lo que permitió incorporar cada uno de los detalles al diseño base, los datos fueron reproducidos en un modelo de dibujo asistido por computadora.

2.2 Metodología del Objetivo Específico 2

Para evaluar y seleccionar los sensores y actuadores adecuados a las condiciones de operación del equipo primero se consultó y cuestiono a las personas que diseñaron el equipo para de esta manera determinar las necesidades experimentales del sistema de reacción. A partir del requisito experimental se evaluaron diferentes alternativas para llevar a cabo el monitoreo de nivel en el reactor de electrolisis, así como la comprobación de voltaje, amperaje que es suministrado al reactor, además de medir el flujo, presión y velocidad del gas a la salida del mismo. La búsqueda comenzó en internet para tener una idea más clara de que tipo de sensores existía, además de buscar en catálogos y libros especializados en sensores y actuadores, después se investigaron los precios correspondientes a cada sensor en tiendas en línea y físicas, así como, la forma de adquisición de estos. Finalmente, el proceso de selección se realizó con base a los diversos parámetros tales como precio, posibilidad de conseguirlo, así como la facilidad de uso e implementación en el sistema.

2.3 Metodología del Objetivo Específico 3

Una vez terminada la etapa de selección de sensores se plantea la lógica de funcionamiento, esto es conocer la forma de conexión, arranque y funcionamiento de cada sensor debido a que es fundamental para poder programar de manera más eficaz. Para ello se buscó la ficha de datos (Datasheet) de cada sensor y actuador, el cual contiene la forma de conexión con la cual se plantearon los esquemas de conexión en un programa libre de automatización de diseño electrónico. Finalmente, se propone la combinación de todos los sensores partiendo de la señal que es enviada desde la fuente de energía que pasa por los sensores hasta llegar al reactor.

La energía que hace funcionar al sistema de reacción electrolítica proviene de una fuente de energía regulable que está conectada al suministro de energía del laboratorio, entre ella y el electrolizador se encuentra un relevador y dos sensores que están constantemente monitoreando el voltaje y amperaje. El relevador funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico el cual prende y apaga el sistema dependiendo las necesidades del usuario, al mismo tiempo los sensores muestran en tiempo real los valores de voltaje y amperaje que está pasando a través de ellos. El control del relevador se lleva a cabo por medio de una pantalla táctil que a su vez controla el llenado del reactor con una electroválvula y monitorea el tanque de almacenamiento de solución por medio un sensor ultrasónico, además mide la presión y producción de gas que se está produciendo.

2.4 Metodología del Objetivo Específico 4

Para la programación se desarrollaron en primera instancia bocetos para tener una idea de cómo sería la interface gráfica que manipulará el usuario, después de ser evaluados por las personas que manipularan el sistema modular y ver que era fácil su funcionamiento se procedió a programarlo por segmentos, para de esta manera evitar un mal funcionamiento y facilitar la identificación de errores que podían existir durante proceso de desarrollo.

El primer segmento consistió en programar la interface de bienvenida hasta la contraseña, esto es, la primera pantalla que aparece muestra los datos de la universidad donde se desarrolló la interface y el título del proyecto, a continuación, aparece la pantalla donde es necesario introducir una contraseña, esto asegura que personas exteriores al proyecto no puedan tener acceso al manejo del equipo, después de introducir la contraseña muestra el primer menú.

2.5 Metodología del Objetivo Específico 5

Una vez concluidas las pruebas individuales y el acoplamiento del código se procedieron a conectar y comprobar el funcionamiento del Hardware y Software del elemento de control en el sistema de reacción, con el uso de una computadora y la plataforma electrónica conectada al sistema de reacción junto con todos los accesorios y verificar mediante pruebas experimentales que los resultados y el funcionamiento sean los correctos.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados del Objetivo Especifico 1

Se caracterizó del sistema modular de reacción por Pacheco *et al.* (2017) como podemos ver en la Figura 4 las dimensiones del sistema son 210x105x60 cm, el sistema cuenta con dos módulos principales: 1) módulo de almacenamiento y 2) módulo de producción de HHO.

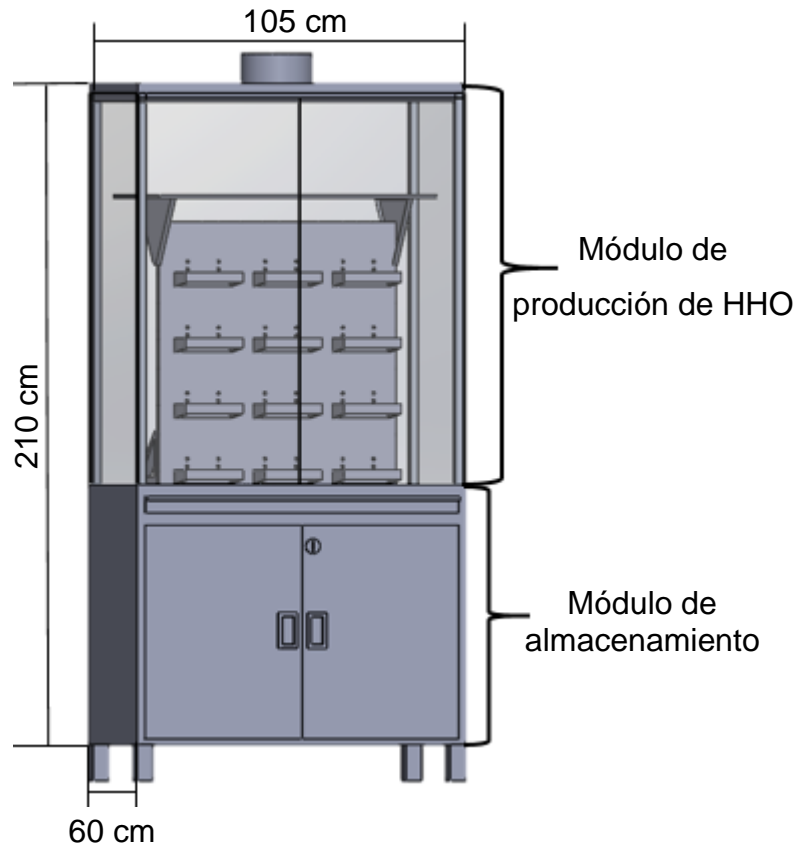


Figura 4. Sistema modular para la producción de HHO.

El módulo de almacenamiento Figura 5 se mantiene reservada para colocar los componentes eléctricos, así como las herramientas necesarias para el funcionamiento de los electrolizadores.

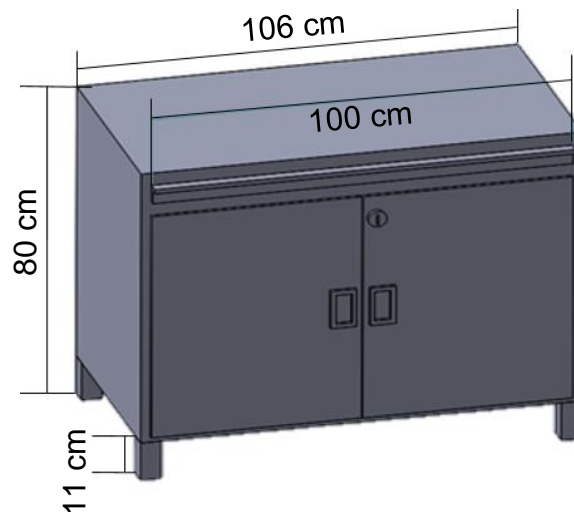


Figura 5. Módulo de almacenamiento.

El módulo de producción de HHO, a su vez se puede dividir en dos secciones: a) de contención y b) tablero de reactores como se puede ver en la Figura 6. La sección de contención (Figura 7) funciona como un sistema de seguridad para el usuario en caso de explosión, mientras que la sección de tableros (Figura 8) consiste en un tablero con perforaciones en el cual se colocaron 12 repisas las cuales se pueden cambiar de posición de acuerdo a los requerimientos necesarios para la colocación de los electrolizadores, también en la parte superior tiene un soporte más grande donde se coloca el tanque que va a abastecer la solución a los electrolizadores.

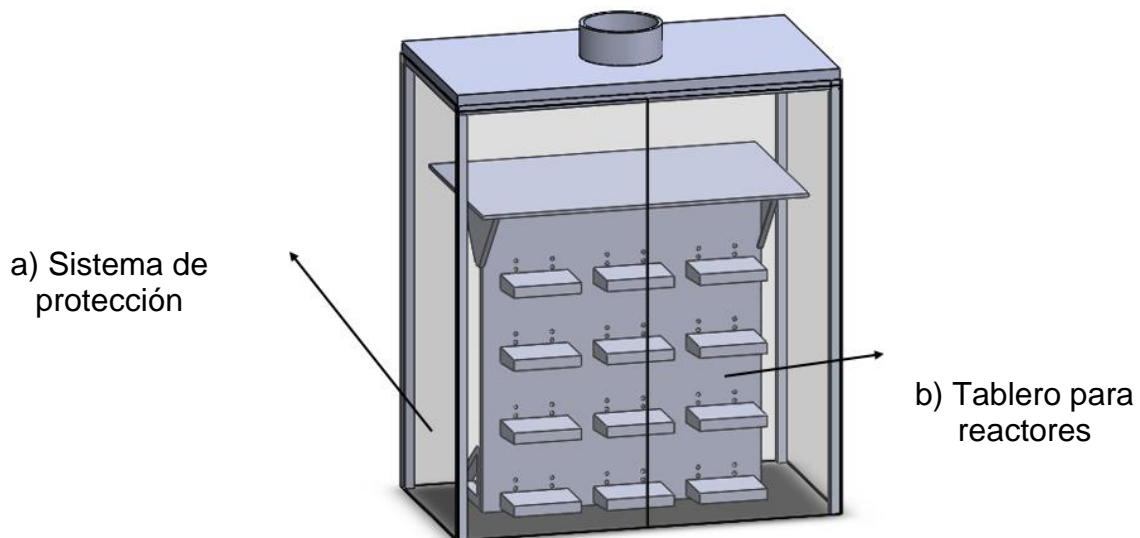


Figura 6. Módulo de producción de HHO.

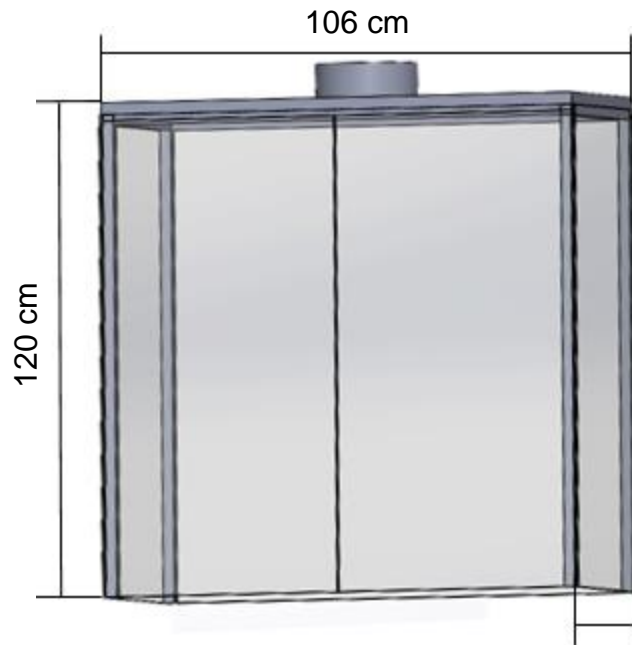


Figura 7. Sistema de protección.

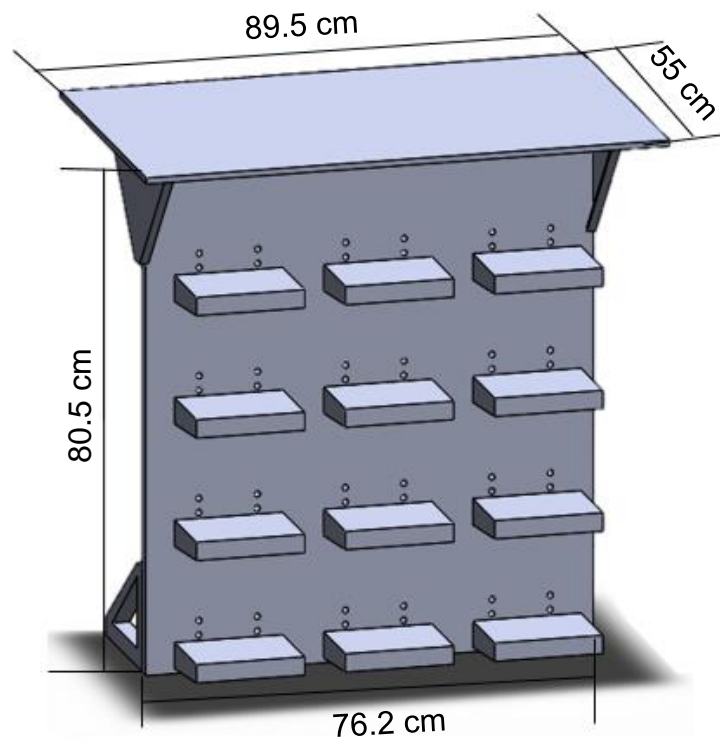


Figura 8. Tablero para reactores.

Debido a que se pueden cambiar de posición las repisas estas se modificaron para realizar las primeras pruebas con un solo reactor. En la Figura 9 se muestra el tablero modificado, al cual se le retiraron 6 repisas y en su lugar está colocado un tanque de almacenamiento vertical con un volumen máximo de 1900 mL (las medidas se muestran en Figura 10) además, cuenta un dispositivo de seguridad extra que es el arrestador de flama hidráulico.

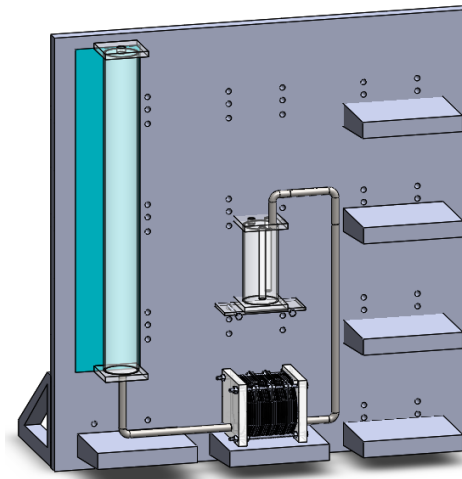


Figura 9. Tablero modificado.

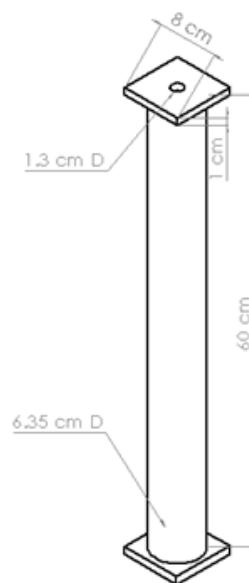


Figura 10. Tanque de almacenamiento de electrolito

El módulo modificado completo se pueden ver en la Figura 11

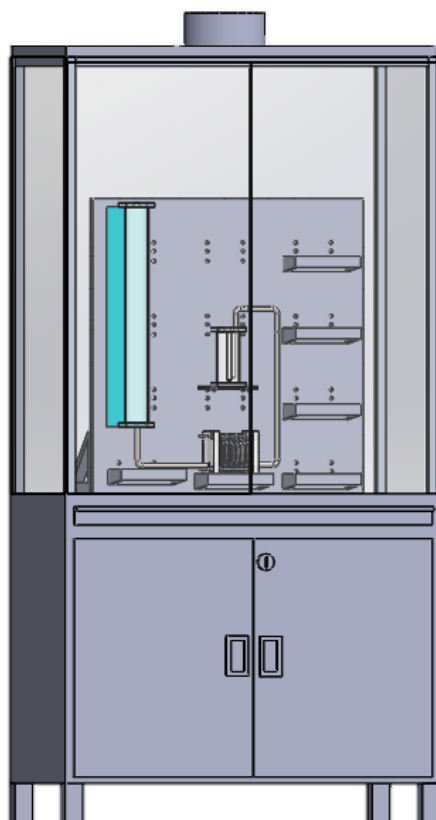
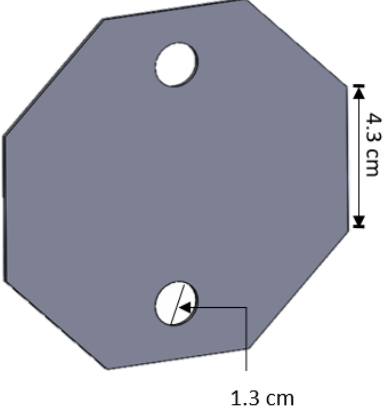
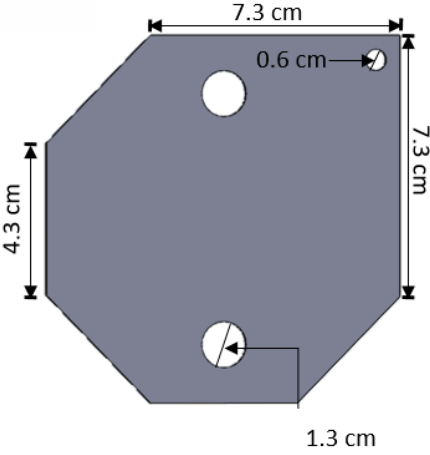



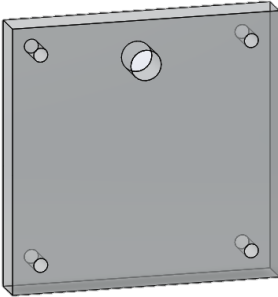
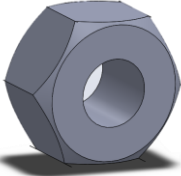

Figura 11. Módulo de reacción modificado.

Caracterización del electrolizador.

El electrolizador cuenta con varios componentes como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Componentes del sistema de reacción.

Nombre	Dimensiones	Detalle mecánico
Placa neutra	Espesor: 1 mm	
Placa con carga	Espesor: 1 mm	
Empaque	Espesor: 0.17 cm Diámetro: 9 cm	

Placa de acrílico	Espesor: 1.5 cm Lado: 11.4 cm	
Tuerca		
Tornillo	Longitud: 14 cm	

A partir de los componentes antes mencionados se pueden hacer combinaciones con las placas de acero (neutras y con carga) como se puede ver en la Figura 12 para obtener una mayor o menor cantidad de HHO.

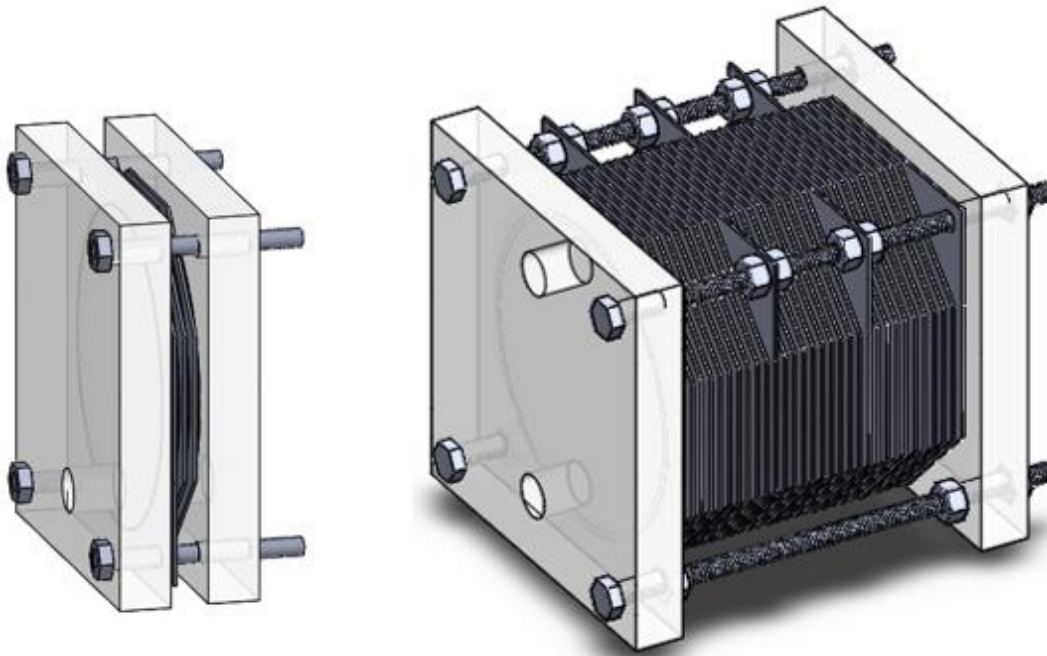


Figura 12. Diferentes configuraciones que puede tener el electrolizador.



3.2 Resultados del Objetivo Especifico 2

Una vez terminada la caracterización del equipo se procedió a buscar los sensores que cumplieran con los requerimientos de: medición de flujo, presión, nivel, voltaje y amperaje. A continuación, se muestra mediante tablas la comparación de los diferentes sensores encontrados en cada categoría.

Los primeros dispositivos buscados fueron los componentes para prender y apagar la energía que iba a ser suministrada al reactor. Para en encendido y apagado del reactor se buscaron varios instrumentos, empero, ninguno se podía conectar a la pantalla táctil, por tal motivo se seleccionó el relevador que se puede conectar a la pantalla para tener un mejor control y funciona como un interruptor on/off

Los sensores de flujo son de vital importancia debido a que es necesario conocer la cantidad de gas que se está produciendo. Los resultados se muestran en Tabla 2.



Tabla 2. Sensores para medición de flujo.

Tipo	Sensor de flujo	Sensor de flujo
Modelo	YF-s201	YF-s401
Imagen		
Costo	\$100.00 a \$140.00	\$110.00 a \$150.00
Rango de Caudal	1 L/min a 30 L/min	003 L/min a 6 L/min
Diámetro de conectores	1/2 in	1/8 in
Presión máxima	2.0 MPa	1.75 MPa
Temperatura de operación	-25°C a +80°C	-25 °C a +80 °C
Tensión de trabajo	5 V a 18 V	5 V a 18 V
Compatible con Arduino	Sí	Sí

Señal	Digital	Digital
-------	---------	---------

El sensor de flujo seleccionado para monitorear el gas producido por el reactor electrolítico fue el YF-s401, el precio es un factor importante a considerar, sin embargo, la variable que determino cual era el más óptimo fue el caudal que este podía medir




Tabla 3. Sensores para presión y velocidad del gas.

Tipo	Tubo Pitot	Anemómetro
Modelo	MPXV7002DP	LM-8000
Imagen		
Costo	\$198.00 a \$1300.00	\$ 1800.00 a \$4100.00
Rango de Velocidad	---	0.4 m/s a 30 m/s
Diámetro de conectores	1.07 mm	---
Rango de Presión	-2 kPa a 2 kPa	---
Temperatura de operación	10 °C a 60 °C	0 °C a 50 °C
Tensión de trabajo	5 V	1 Batería de 9 V
Compatible con Arduino	Sí	No
Señal	Analógica	---

Como se muestra en la Tabla 3 el costo del tubo pitot es mucho menor en comparación con el anemómetro, además de que con él se pueden realizar dos mediciones, la primera es la presión y con eso medir la velocidad.

Los sensores de nivel presentados en la Tabla 4

Tabla 4. Sensores de nivel

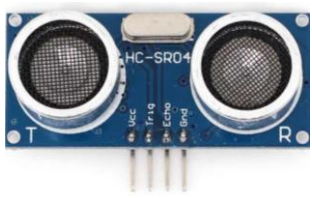


Tipo	Sensor de nivel	Interruptor	Sensor de nivel
Modelo	T1592	---	XKC Y25 T12V
Imagen			
Costo	\$20.00- \$70.00	\$60.00 -\$180.00	\$300.00-\$450.00
Voltaje de Operación	3 - 5 VDC	5 VDC	5 - 24 VDC
Corriente de operación	20 mA	0.5 A	5 mA
Temperatura de operación	10°C-30 °C	-20 a 80 °C	0 - 100°C
Compatible con Arduino	Sí	Sí	Sí
Señal	Analógica	Digital	---

Debido a que dos de los sensores encontrados son invasivos se descartaron inmediatamente debido a que al momento de entrar en contacto con la solución podría causar alteración en el proceso de reacción, el tercer sensor era el preferido el inconveniente era en primer lugar el precio y en segundo la disponibilidad de adquisición. Por tales motivos se optó en lugar de monitorear el reactor directamente durante el llenado, contemplar el nivel del tanque de almacenamiento, debido a que la cantidad de líquido que ingrese al reactor será el que se reduzca en el tanque. Por tal motivo se prefirió usar sensores que midieran la distancia y con ello calcular el volumen de desplazamiento.

Los sensores propuestos para cumplir con esta tarea se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5 Sensores que miden distancia.

Tipo	Ultrasónico	Óptico Sharp	Óptico
Modelo	HC-sR04	Gp2y0a21yk0f	Lm393



Imagen			
Costo	\$20.00 a \$45.00	\$160.00 a \$250.00	\$ 24.00 a \$40.00
Voltaje de Operación	Dc-5 v	Dc-5 v	DC - 5V
Rango de distancia	2 cm a 4 m	10 cm a 80 cm	20 a 300mm
Corriente de operación	15 mA	33 mA	---
Compatible con Arduino	Sí	Sí	Sí
Señal	Digital	Analógica	Digital

La selección para ese sensor fue un poco más complicada debido a que el sensor ultrasónico y óptico cuentan con un costo accesible, además de compatibilidad con Arduino y una instalación fácil en el tanque de almacenamiento, sin embargo, hubo dos factores fundamentales que marcaron la diferencia: en primera instancia fue el rango de distancia, ya que el ultrasónico tiene un rango más amplio que el óptico, en segundo lugar y considerando el factor determinante es que las lecturas del sensor Lm393 son afectadas por la luz que exista alrededor de él. Por tales motivos se optó por usar el sensor ultrasónico HC-sR04.

Para la medición de voltaje y corriente se consideraron varios sensores especializados en este tipo de lectura




Tabla 6. Sensores de voltaje y corriente

Tipo	Modulo sensor voltaje y corriente	Medidor de voltaje y corriente
------	-----------------------------------	--------------------------------

Imagen		
Costo	\$60.00 - \$90.00	\$120.00 - \$250.00
Voltaje de Operación	DC 5 V	---
Rango de Voltaje	DC 3 - 25V	DC 0-100 V
Rango de corriente	DC 0 - 3A	DC 0-10 A
Compatible con Arduino	Sí	No
Señal	Analógica	----

El módulo de corriente era la opción más conveniente para el desarrollo de este trabajo, el problema de dio cuando al momento de buscarlo en tiendas tanto físicas como en línea estaba agotado, entonces aunque el precio era algo elevado se consideró el medidor de voltaje y corriente, el conflicto reside en que no se podía conectar a la tarjeta de adquisición de datos por lo cual fue descartado pues es necesario guardar la información durante las pruebas realizadas para después hacer un análisis de esos datos. Por la tanto se consideraron los sensores individuales Tabla 7.

Tabla 7. Sensores individuales de voltaje y corriente.

Tipo	Sensor de voltaje	Sensor de corriente	Sensor de corriente
Modelo	Fz0430	ACS712	SCT-013
Imagen			
Costo	\$14.00 - \$30.00	\$50.00 - \$75.00	\$150.00 - \$75.00

Voltaje de Operación	DC 5 V	DC 5 V	
Rango de Voltaje	DC 0 - 25V	---	DC 0-30 A
Rango de amperaje	---	DC 0 – 5 A DC 0 – 30 A	DC 0 - 30A
Compatible con Arduino	Sí	Sí	Sí
Señal	Analógica	Analógica	Analógica

3.3 Resultados del Objetivo Especifico 3

Los sensores seleccionados se conectaron individualmente para realizar pruebas de validación con el código correspondiente.



Figura 13. Conexión de la pantalla TFT a Arduino

Tabla 8. Designación de los pines para conexión de pantalla TFT.

Nombre	Pin (Arduino Mega)
LCD_RST	A4
LCD_CS	A3
LCD_RS	A2
LCD_WR	A1
LCD_RD	A0
GRD	GRD
5V	5V
3V3	3V3
LCD_D2	PWM 2

LCD_D3	PWM 3
LCD_D4	PWM 4
LCD_D5	PWM 5
LCD_D6	PWM 6
LCD_D7	PWM 7
LCD_D0	PWM 8
LCD_D1	PWM 9
SD_SS	PWM 10
SD_DI	PWM 11
SD_D0	PWM 12
SD_SCK	PWM 13

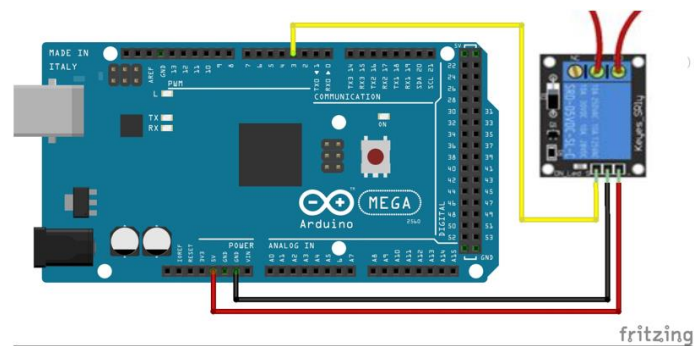


Figura 14. Diagrama de conexión del Relay a Arduino, realizado en Fritzing.

```

const int myRelee = 32;
void setup(){
  // Relee
  pinMode(myRelee, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop(){
  digitalWrite(myRelee, HIGH);
  Serial.println("Relee apagado");
  delay (2000);
  digitalWrite(myRelee, LOW);
  Serial.println("Relee encendido");
  delay (2000);
}

```

Figura 15. Código para el Relevador.

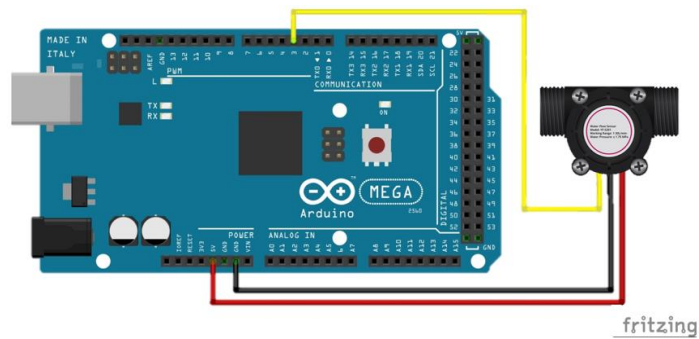


Figura 16. Diagrama de conexión del sensor YF-s401 a Arduino realizado en Fritzing.

```

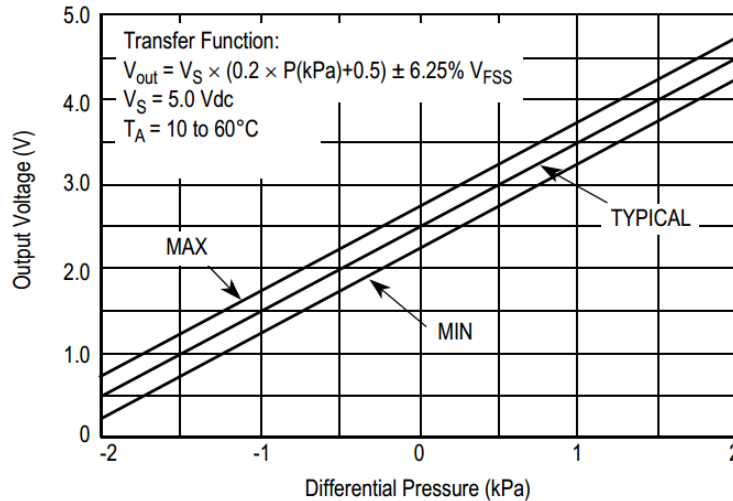
int flowsensor = 2;
float flow_frequency, YFs401,V;
long currentTime,cloopTime;
String YF;

void flow (){
    flow_frequency++;
}
void setup(){
    Serial.begin(9600);
    pinMode(2, INPUT);
    attachInterrupt(0, flow, RISING);
    sei();
    currentTime = millis();
    cloopTime = currentTime;
}
void loop (){
    currentTime = millis();
    if(currentTime >= (cloopTime + 1000)){
        cloopTime = currentTime;
        YFs401 = (flow_frequency/ 98);
        flow_frequency = 0;
        YF=String(YFs401);
        V=YFs401/0.7921;
        Serial.print(YFs401);
        Serial.println(" L/min");
        Serial.print(V);
        Serial.println(" m/s");
    }
    delay(1500);
}

```

Figura 17. Código para el sensor YF-s401.

Para la realización del programa del tubo pitot primero se buscó la ficha de datos (Datasheet) del sensor, la cual contiene la Gráfica 1 que indica el voltaje de salida de acuerdo al diferencial de presión, además de tener la función de transferencia para el cálculo del voltaje de salida.



Gráfica 1. Voltaje de salida contra presión diferencial (Datasheet).

Para calcular por medio del tubo pitot el flujo de gas que se está obteniendo es necesario usar la función de transferencia obtenida del Datasheet.

$$V_{out} = V_S * [(0.2 * P[kPa]) + 0.5] \pm 6.25\% V_{fss}$$

$$V_S = 5 \pm 0.25 V_{dc}$$

$$P = \frac{\left(\frac{V_{out} \mp 6.25\% V_{fss}}{V_S} - 0.5 \right)}{0.2}$$

// Convertir bit a voltaje

$$V_{out} = \left(\frac{5 * analogR}{1023} \right)$$

$$P = \frac{\left(\frac{V_{out} \mp 0.0625}{5 \pm 0.25} - 0.5 \right)}{0.2}$$

$$\rho_H = 0.0899 \frac{kg}{m^3}$$

$$V = \sqrt{\frac{(2.0 * P) * 1000}{rho}}$$

El análisis dimensional se desarrolla a continuación, para comprobar de esta manera que no hay inconsistencias al momento del despeje de la ecuación.

$$V = \sqrt{\frac{[kPa]}{\left[\frac{kg}{m^3}\right]}} = \sqrt{\frac{1000[Pa]}{\left[\frac{kg}{m^3}\right]}} = \sqrt{\frac{1000 \left[\frac{kg}{m \cdot s^2}\right]}{\left[\frac{kg}{m^3}\right]}} = \sqrt{1000 \left[\frac{m^3}{m \cdot s^2}\right]} = \sqrt{1000 \left[\frac{m^2}{s^2}\right]}$$

$$V [=] \sqrt{1000} \left[\frac{m}{s}\right]$$

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver la conexión del sensor con Arduino

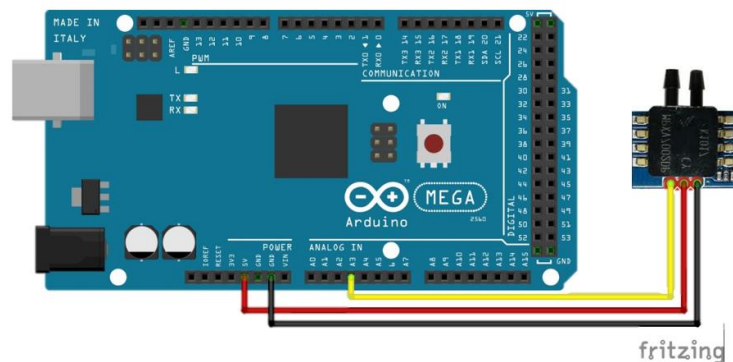


Figura 18. Diagrama de conexión del sensor MPXV7002DP a Arduino realizado en Fritzing

Después de haber realizado la conexión como se muestra en el diagrama anterior se procedió a comprobar la validación del código de programación en Arduino como se ve en la Figura 19 para conocer los valores arrojados por el sensor.


```

int sensorPin = 0;
int sensorValue;
int offset;
float Vout,P, V;
float rho=0.0899; //densidad del gas (hidrogeno) [kg/m3]
float A=0.05; //área sección transversal en m2
float Vol;

void setup() {
  Serial.begin(9600);}
void loop() {
  int i=0, sum=0;
  int offset=0;
  int f=10;

  for(i=0;i<f;i++)
  {
    sensorValue = analogRead(sensorPin)-512;
    sum+=sensorValue;
  }
  offset=sum/f; //promedio del offset obtenido
  while(1)
  {
    sensorValue = analogRead(sensorPin)-offset;
    Vout=(5*sensorValue)/1023.0;
    P=((Vout/5)-0.5)/0.2*1000; //ecuación obtenida de Figura 4 datasheet
    if (P <0)
      P=0;
    else
      P=P;
    Serial.print("Presure = " );
    Serial.print(P); //Presión calculada con el sensor
    Serial.println(" Pa");
    V=sqrt((2*P)/rho); //velocidad del gas
    Serial.print("Velocity = " );
    Serial.print(V);
    Serial.println(" m/s");
    Vol=V*A; //flujo volumétrico del gas
    Serial.print("Volumetric flow = " );
    Serial.print(Vol);
    Serial.println(" m3/s");
    delay(1000);
  }
}

```

Figura 19. Programación en Arduino del tubo pitot.

La prueba consistió en conectar una manguera de la tubería de aire al arrestador de flama, posteriormente conectar el tubo pitot a Arduino y colocarlo en un orificio del tubo que fue manufacturado exclusivamente para el sensor, por último, a la salida de este tubo se colocó el anemómetro para de esta manera poder comparar los resultados y asegurar que el tubo pitot nos proporcionaba los datos correctos.

Los resultados obtenidos de las pruebas se pueden ver en la Tabla 9, en la cual se compara el valor de la velocidad medida con el tubo pitot y la obtenida con el anemómetro.

Tabla 9. Resultados de las pruebas realizadas con el tubo pitot

Prueba 1		Prueba 2	
Tubo pitot [m/s]	Anemómetro [m/s]	Tubo pitot [m/s]	Anemómetro [m/s]
8.24	0	8.25	0

8.71	0.9	9.18	1
9.15	1.2	9.15	1.5
9.15	1.5	9.87	2
9.99	2.1	10.60	2.5
10.76	2.5	11.87	3
12.47	3.4	12.79	3.5
12.79	3.8	14.26	4
14.26	4.3	14.33	4.5
15.6	5	15.6	5

Después de realizar las pruebas lo que podemos notar es que existe un error muy grande en la lectura del tubo pitot con respecto al anemómetro.

Al analizar los resultados fue necesario realizar una corrección en el código del sensor. Después de hacer la modificación en el código se realizaron nuevamente la prueba con la configuración antes mencionada, para comprobar que el valor dado por el sensor era correcto, los resultados se pueden ver en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de las pruebas

Prueba 1		Prueba 2	
Tubo pitot [m/s]	Anemómetro [m/s]	Tubo pitot [m/s]	Anemómetro [m/s]
0.2	0	0.3	0
1	1	1.2	1
1.5	1.5	1.4	1.5
1.7	2	1.9	2
2.4	2.5	2.6	2.5
2.5	3	3.2	3
3.1	3.5	3.4	3.5
3.6	4	3.8	4
4.5	4.5	4.7	4.5
5.2	5	5.3	5

Posterior a la modificación realizada el sensor arrojó datos más acertados como podemos ver en la Tabla 10, lo que asegura que las mediciones sean más confiables.

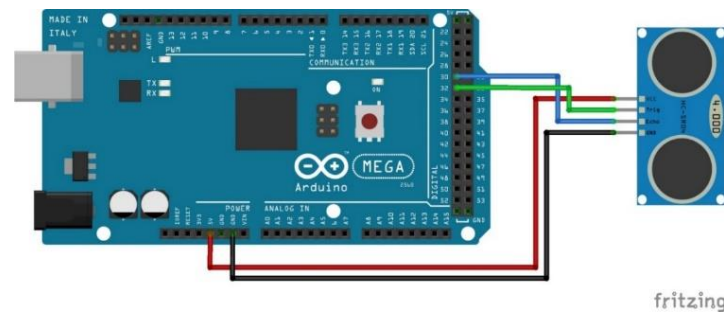


Figura 20. Diagrama de conexión del sensor HC-SR04 a Arduino, realizado en Fritzing.

```

#define trigPin 32
#define echoPin 30
float v1,v;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode (echoPin, INPUT);
}
void loop() {
  float duracion, distancia;
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(1000);
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  duracion=pulseIn(echoPin, HIGH);
  distancia=((duracion/2)*0.034);
  Serial.print(distancia);
  Serial.print(" cm \n");
  delay(700);
}

```

Figura 21. Código del sensor HC-SR04.

CALCULO DE VOLUMEN

Para calcular el volumen de mezcla necesario para el sistema de reacción en primera instancia se calculó el volumen que puede almacenar la placa que está limitada por el empaque y el orificio donde pasa el agua en la parte superior, por tal motivo se hizo uso del cálculo de área de un tubo parcialmente lleno como se puede ver en la Figura 22, para calcular el área se debe utilizar la Ecuación (5)

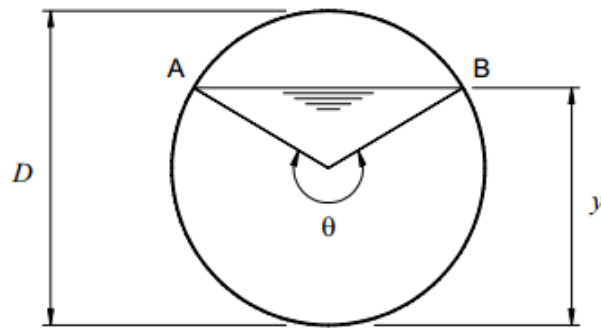


Figura 22. Cálculo de un tubo parcialmente lleno.

$$A = \frac{r^2}{2} (\theta - \text{Sen}\theta) \quad (5)$$

Donde A es el Área del tubo parcialmente lleno, r el radio del círculo y θ el ángulo en radianes.

En la Figura 23 se muestra el área en la placa que contendrá la mezcla de agua y electrolito la cual es limitada por el empaque.

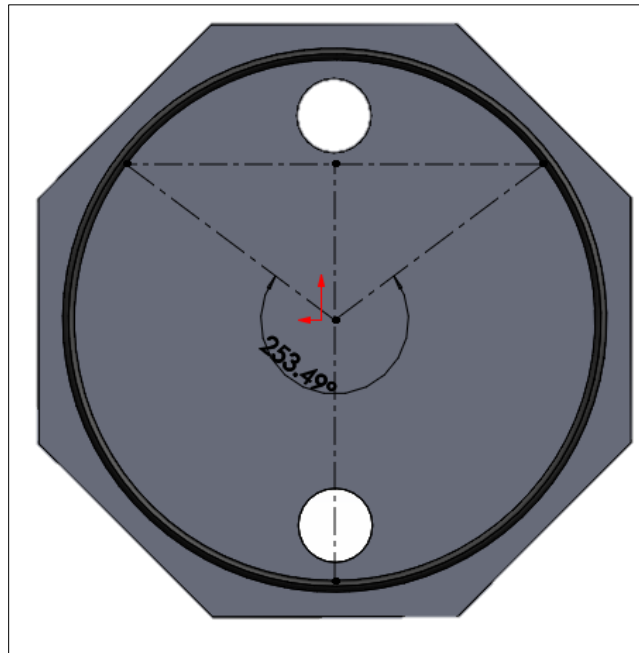


Figura 23. Placa neutra con empaque.

$$\varphi = 253.49^\circ$$

Para hacer uso de la Ecuación (5) es necesario que el ángulo este en radiales por lo cual se hace uso de la Ecuación 6) para realizar la conversión.

$$\theta = \alpha \left(\frac{\pi}{180} \right) \quad (6)$$

$$\theta = 4.42 \text{ rad}$$

$$A = \frac{4.5^2}{2} (4.42 - \text{Sen}(4.42))$$

$$A = 54.44 \text{ cm}^2$$

Para calcular el volumen de la mezcla en la placa y el empaque se utiliza la Ecuación (7)

$$V = A \cdot h \quad (7)$$

$$h = 0.17 \text{ cm}$$

$$V = 9.25 \text{ cm}^3$$

Para calcular el Volumen total de mezcla que contendrá el sistema de reacción se utiliza la Ecuación (8).

$$V_{max} = V \cdot \#totaldeempaque \quad (8)$$

$$V_{max} = 296 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{reactores}} = 2664 \text{ cm}^3 = 2.7 \text{ L}$$

La ecuación (8) es introducida para calcular el volumen con el sensor ultrasónico.

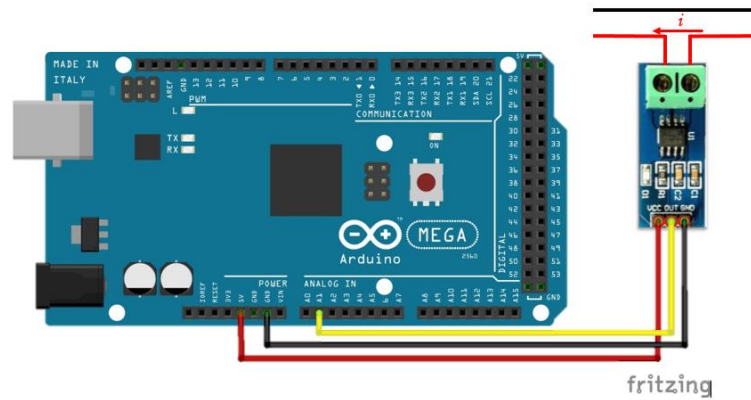


Figura 24. Diagrama de conexión del sensor Acs712 a Arduino, realizado en Fritzing

```

float Sensibilidad=0.185;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  float voltajeSensor= analogRead(A1)*(5.0 / 1023.0);
  float I=(voltajeSensor-2.5)/Sensibilidad;
  Serial.print("Corriente: ");
  Serial.println(I,3);
  delay(1000);
}

```

Figura 25. Código para el sensor Acs712.

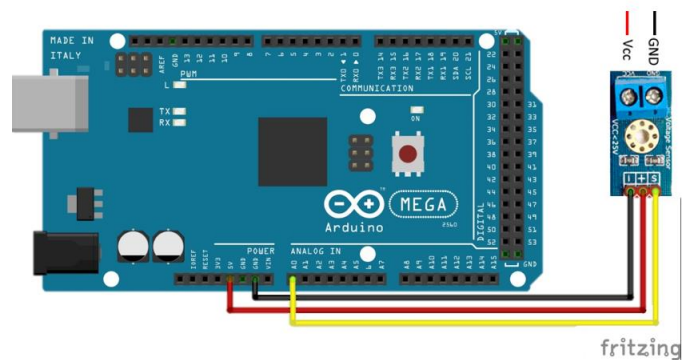


Figura 26. Diagrama de conexión del sensor Voltaje a Arduino, realizado en Fritzing.

```

#include <Wire.h>
int val11;
float val2;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Voltage: ");
  Serial.print("V");
}
void loop(){
  float temp;
  val11=analogRead(0);
  temp=val11/4.092;
  val2=(temp/10);
  Serial.println(val2);

  delay(1500);
}

```

Figura 27. Código para el sensor de Voltaje.

Finalmente, para almacenar los datos adquiridos durante el proceso se usa un módulo SD

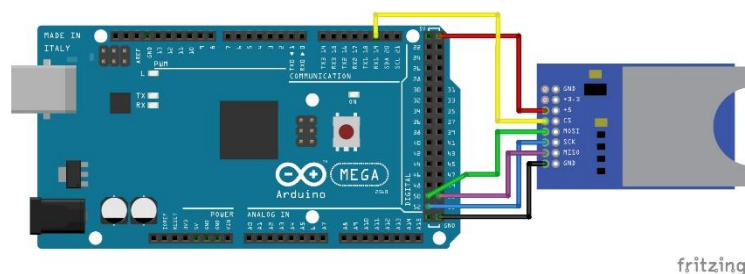


Figura 28. Diagrama de conexión del módulo SD, realizado en Fritzing.

El código para este módulo se divide en dos, el de la Figura 29 corresponde a la escritura en la memoria, el segundo se muestra en la Figura 30 es para leer los datos desde la memoria, en caso de que no se quiera hacer de esta manera la memoria puede ser retirada y ver los resultados en una computadora

```
#include <SD.h>
File myFile;
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Iniciando SD ...");
  if (!SD.begin(19)) {
    Serial.println("No se pudo inicializar");
    return; }
  Serial.println("inicializacion exitosa");
  if(!SD.exists("prueba7.txt")){
    myFile = SD.open("prueba7.txt", FILE_WRITE);
    if (myFile) {
      Serial.println("Archivo nuevo, Escribiendo encabezado(fila 1)");
      myFile.println("Tiempo(ms), Sensor1, Sensor2, Sensor3");
      myFile.close(); }
    else {
      Serial.println("Error creando el archivo datalog.csv"); } }}

void loop(){
  myFile = SD.open("prueba7.txt", FILE_WRITE);//abrimos el archivo

  if (myFile) {
    Serial.print("Escribiendo SD: ");
    int sensor1 = analogRead(0);
    myFile.print(millis());
    myFile.print(","); myFile.println(sensor1);
    myFile.close(); //cerramos el archivo
    Serial.print("Tiempo(ms)="); Serial.print(millis());
    Serial.print(", sensor1="); Serial.println(sensor1); }
  else {
    Serial.println("Error al abrir el archivo"); }
  delay(1000);
}
```

Figura 29. Código para escritura de datos en el Módulo SD.


```

#include <SD.h>
File myFile;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Iniciando SD ...");
  if (!SD.begin(19)) {
    Serial.println("No se pudo inicializar");
    return;
  }
  Serial.println("inicializacion exitosa");
  myFile = SD.open("prueba7.txt");
  if (myFile) {
    Serial.println("prueba7.txt:");
    while (myFile.available()) {
      Serial.write(myFile.read());
    }
    myFile.close(); //cerramos el archivo
  }
  else {
    Serial.println("Error al abrir el archivo");
  }
}
void loop()
{ }

```

Figura 30. Código para lectura de datos del Módulo SD.

3.4 Resultados del Objetivo Especifico 4

Los bocetos realizados del primer segmento de programación Figura 31

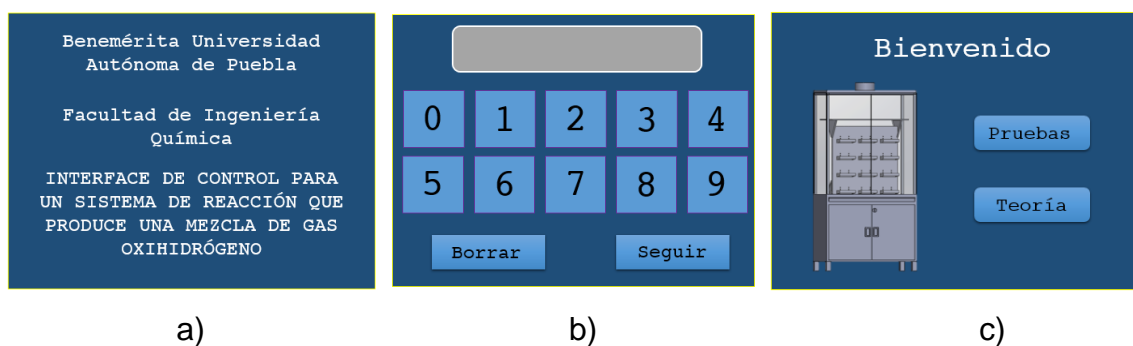


Figura 31. Bocetos de a) Pantalla inicial. b) Pantalla de contraseña c) Primer menú

Las siguientes pantallas muestran como se ve cuando se oprime la opción de pruebas.

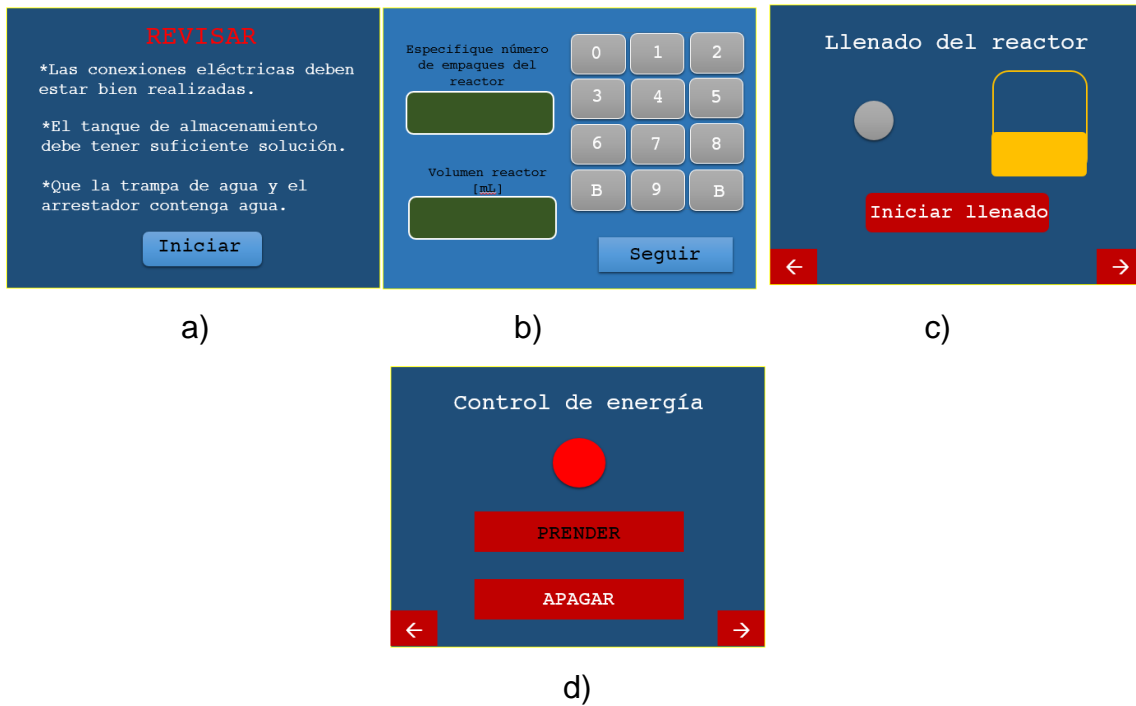


Figura 32. a) Pantalla de advertencias. b) Pantalla de especificación de número de placas.

Bibliografía

- Ball, M., & Weeda, M. (2015). The hydrogen economy - Vision or reality? *International Journal of Hydrogen Energy*, 7903-7919.
- Bennett, N., Ding, Y., Scott, K., & Shen, M. (2011). A concise model for evaluating water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 14335-14341.
- Bhandari, R., A. Trudewind, C., & Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis -a review. *Journal of Cleaner Production*, 151-163.
- Bolton, W. (2006). *Ingeniería de control*. México: ALFAOMEGA.
- Carrillo Paz, A. J. (2011). *Sistemas Automáticos de Control*. Venezuela: UNERB.
- Corripio, A. B., & Smith, C. A. (1991). *Control automático de procesos: teoría práctica*. México: LIMUSA.
- Hernández Gaviño, R. (2012). *Introducción a los sistemas de control*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., & Moussiopoulos, N. (2004). Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1443-1450.
- Lehner, T. S. (2014). *Power-to-gas: Technology and Business Models*. London: Springer.
- Lipták, B. (26 de 10 de 2017). *Controlglobal*. Obtenido de <https://www.controlglobal.com/articles/2008/158/?show=all>
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 597-611.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.

Pacheco Aguirre, F., Nuñez Borja, A., Rodríguez, R., & López, K. (2017). *Modelación y simulación de la generación de hidrógeno a partir de reactores electrolíticos de celda seca y fotoceldas de silicio monocristalino en la ciudad de Puebla*. Puebla.

Ramírez Ramos, O. (12 de Junio de 2008). Simulación en SimMechanics de un sistema de control difuso para el robot. Puebla, Cholula, México.

Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. 1998. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Prentice-Hall International, Inc.

Ursua, A., Gandía, L., & Sanchis, P. (2012). Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 410-426.